



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

InGaN/GaN 양자우물구조에 생성되는 v-groove

주위의 음극형광특성에 대한 연구

The Study of cathodoluminescence properties of v-groove in

InGaN/GaN hetero-structure

2014년 2월

서 울 대 학 교 대 학 원

재 료 공 학 부

이 중 환

InGaN/GaN 양자우물구조에 생성되는 v-groove

주위의 음극형광특성에 대한 연구

The Study of cathodoluminescence properties of v-groove in

InGaN/GaN hetero-structure

지도 교수 김 영 운

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2014년 2월

서울대학교 대학원

재료공학부

이 중 환

이중환의 공학석사 학위논문을 인준함

2014년 2월

위 원 장 김 미 영 (인)

부위원장 김 영 운 (인)

위 원 장 호 원 (인)

초 록

현재 조명용으로 각광을 받고 있는 Light Emitting Diode (LED) 소자는 1970년대 적색 발광소자를 기반으로 개발된 후 지속적으로 효율이 증가되고 있으며, 소자의 응용분야가 확대되고 있다. 특히, 질화물계 반도체 (AlN, GaN, InGaN, AlGaIn, etc.) 는 조성비 변화에 따라 energy band gap을 조절할 수 있으므로, 조성비를 조절하여 red부터 UV 영역까지 빛을 낼 수 있는 소자를 개발할 수 있다. 또한 LED는 환경 친화적이고, 일반 조명보다 작은 전력소모, 긴 수명 등 많은 장점을 가지고 있다. 이에 기반하여 LED 시장은 급속히 성장하고 있으며, 현재 LED package의 cost per lumen가 약 12.5 \$/klm인 것을 2015년도까지 약 2 \$/klm으로 낮추기 위한 연구가 진행되고 있다. 따라서 이와 같은 목표를 달성하기 위해서는 발광효율의 증가에 대한 연구가 필수적으로 진행되어야 한다.

이상적으로 LED의 내부 양자 효율은 인가하는 전류의 세기와 비례해야 한다. 그러나 LED의 미세 구조 변화에 따라서 양자효율의 변화가 생기기 때문에, 미세 구조와 발광 특성 간 관계를 밝히는 것은 LED 소자를 개발하는데 필수적인 요소로 작용한다

기존 많은 논문들에서 InGaIn/GaN Multi-Quantum Wells (MQWs) 구조를 갖는 LED에서 발광 특성과 소자의 미세구조 관계를 연관시키기 위해 Scanning Electron Microscopy (SEM) 과 CL이 결합 시스템과 TEM을 이용한 미세구조 분석 결과를 비교하여 분석하였다. 그러나 이러한 방법은 장비의 공간 분해능의 한계로

인하여 국부적인 영역에서 발광 특성을 제시하지 못하고 있다. 본 실험에서는 Transmission Electron Microscopy (TEM) 과 CL (Cathodoluminescence) 가 결합된 시스템을 이용하여, MQWs 구조를 갖는 상용화 InGaN/GaN hetero-structure LED에서 내부 구조와 발광 특성간 관계를 밝히고자 하였다.

실험과정은 먼저 TEM-CL과 PL의 condition을 비교하기 위해, TEM-CL에서 QWs 두께에 따른 발광 세기를 비교하였고, 이를 통해 TEM-CL이 PL에서 low-excitation condition에 대응되는 것을 확인하였다. 다음으로 cross-section sample을 통해서 QWs의 내부 구조와 발광 특성 사이 관계를 밝히고자 하였으며, 시편 전체에서 발광 특성을 파악하기 위해 plan-view 시편을 이용하여 TEM-CL을 진행하였다.

실험 결과, QWs의 두께가 얇아지고 In의 함량이 적어짐에 따라 발광되는 빛이 blue shift가 되었으며, v-groove에서는 다른 지역보다 더욱 짧은 파장의 빛을 내고 있음을 확인하였다. 그리고 TEM-CL과 STEM image로 v-groove 주변 QDisk의 존재를 발견하였으며, 이 QDisk는 주변보다 energy band gap이 낮음을 확인하였다. 따라서 QDisk는 carrier를 효과적으로 capture하므로 발광효율을 높이는 작용을 하며, energy band gap이 높은 v-groove영역은 carrier의 이동을 방해하는 energy barrier로 작용하여 carrier의 delocalization을 유발하므로, carrier가 dislocation영역에서 recombination되는 것을 방해하여 LED의 효율을 높인다는 결론을 낼 수 있었다.

주요어 : TEM-CL, LED, v-groove, 발광특성

학 번 : 2012-20627

이 름 : 이 중 환

목 차

초 록	i
목 차	iii
List of Figures	v
1. 서 론	1
2. 이론적 배경	3
2.1 Cathodoluminescence	3
2.2 GaN을 기반으로 한 Light Emitting Diodes	8
2.2.1 서 론	8
2.2.2 LED 효율	10
2.2.3 Non-radiative recombination	12
2.3 Piezoelectric Field	17
3. 실험방법	19
3.1 TEM 시편준비	19
3.2 TEM-CL	21
3.3 Signal process via S/W	23
4. 실험결과.....	24

4.1 LED 소자 내 QWs의 발광특성	24
4.2 V-groove 주변의 발광특성	32
5. 결 론.....	36
References.....	38
Abstract	40

List of Figures

Figure 2.1.1 Various signal induced by interaction between an electron and a sample

Figure 2.1.2 Franck-Condon principle energy diagram.

Figure 2.1.3 Processes of charge transfer and luminescence production in crystals. 1) Possible path of excited electron; a) radiative recombination b) non-radiative recombination 2) Radiative recombination 3) In-direct recombination 4) The excitation and emission of several energy levels.

Figure 2.1.4 Processes of non-radiative recombination. a) Auger recombination. b) Schokley-Read-Hall recombination c) Thermal relaxation.

Figure 2.2.1 Illustration of LED efficiency droop.

Figure 2.2.2 Schematic illustration of LED current component (A – SRH recombination, B – spontaneous recombination, C – Auger recombination).

Figure 2.2.3 Auger processes a) Phonon-less band-band Auger process, b) Phonon-assisted Auger process, c) Auger process via trap.

Figure 2.2.4 Steps of the recombination-generation processes through intermediate-level centers: (a) electron capture, (b) electron emission, (c) hole capture, (d) hole emission.

Figure 2.2.5 Plot of the SRH recombination contribution versus injection current in the temperature range of 6-440 K.

Figure 2.2.6 Schematics of the quantum confined stark effect in InGaN/GaN hetero-structure.

Figure 2.2.6 Calculated longitudinal piezoelectric field in strained InGaN on GaN as a function of the polar angle from (0001).

Figure 3.1.1 STEM image of Structure of LED chip.

Figure 3.1.2 a) STEM image of QWs around v-groove in LED, b) EDS mapping image by Al, c) EDS mapping image by In, d) high magnification image of QWs.

Figure 3.2.1 Schematic of TEM-CL System.

Figure 3.2.2 Schematic of S/W functions and image production processes a) schematic of image production process, b) introduction of S/W functions.

Figure 3.2.3 Gaussian fitting from 380nm to 465nm through S/W.

Figure 4.1.1 Figure 4.1.1 CL mapping area a) cross-sectional BF image, b) cross-sectional STEM image from v-groove area in a), c) panchromatic CL image : integration range from 380 nm to 465 nm, d) CL spectrum of LED.

Figure 4.1.2 a) color mix CL image composed with CL monochromatic images, b) monochromatic CL images dependence on each range.

Figure 4.1.3 a) STEM image of v-groove, b) CL spectrum of SL and MQW.

Figure 4.1.4 Schematic band diagrams of InGaN/GaN QWs under the electric field F.

Figure 4.1.5 a) CL monochromatic images, b) CL spectrums of A and B region.

Figure 4.1.6 Figure 4.1.6 STEM image of QWs edge region.

Figure 4.1.7 Figure 4.1.7 a) plan-view BF image, b) plan-view STEM image.

Figure 4.1.8 a) a) color mix CL image composed with CL monochromatic images, b) STEM image of CL scanning region, c) monochromatic CL images dependence on each range.

Figure 4.1.9 a) CL monochromatic image, b) CL spectrums of A, B, C and ref region.

Figure 4.2.1 a) Line scan area in panchromatic CL image, b) Line scan image of yellow line in a).

Figure 4.2.2 Estimation QWs thickness of $(1\bar{1}01)$ and (0001) .

Figure 4.2.3 a) peak center wavelength map by gaussian fitting from each pixel, b) 3D reconstruction image by electron energy from a).

Figure 4.2.4 Schematic of energy diagram near v-groove.

1. 서 론

현재 조명용으로 각광을 받고 있는 Light Emitting Diode (LED) 소자는 1970년대 적색 발광소자를 기반으로 개발된 후 지속적으로 효율이 증가되고 있으며, 소자의 응용분야가 확대되고 있다. 특히, 질화물계 반도체 (AlN, GaN, InGaN, AlGaIn, etc.) 는 조성비 변화에 따라 energy band gap을 조절할 수 있으므로, 조성비를 조절하여 red부터 UV 영역까지 빛을 낼 수 있는 소자를 개발할 수 있다. 또한 LED는 환경 친화적이고, 일반 조명보다 작은 전력소모, 긴 수명 등 많은 장점을 가지고 있다. 이에 기반하여 LED 시장은 급속히 성장하고 있으며, 현재 LED package의 cost per lumen가 약 12.5 \$/klm인 것을 2015년도까지 약 2 \$/klm으로 낮추기 위한 연구가 진행되고 있다. 따라서 이와 같은 목표를 달성하기 위해서는 발광효율의 증가에 대한 연구가 필수적으로 진행되어야 한다.

이상적으로 LED의 내부 양자 효율은 인가하는 전류의 세기와 비례해야 한다. 그러나 LED의 미세 구조 변화에 따라서 양자효율의 변화가 생기기 때문에, 미세 구조와 발광 특성 간 관계를 밝히는 것은 LED 소자를 개발하는데 필수적인 요소로 작용한다

기존 많은 논문들에서 InGaIn/GaN Multi-Quantum Wells (MQWs) 구조를 갖는 LED에서 발광 특성과 소자의 미세구조 관계를 연관시키기 위해 Scanning Electron Microscopy (SEM) 과 CL이 결합 시스템과 TEM을 이용한 미세구조 분석 결과를 비교하여 분석하였다. 그러나 이러한 방법은 장비의 공간 분해능의 한계로

인하여 국부적인 영역에서 발광 특성을 제시하지 못하고 있다. 본 실험에서는 Transmission Electron Microscopy (TEM) 과 CL (Cathodoluminescence) 가 결합된 시스템을 이용하여, MQWs 구조를 갖는 상용화 InGaN/GaN hetero-structure LED에서 내부 구조와 발광 특성간 관계를 밝히고자 하였다.

실험과정은 먼저 TEM-CL과 PL의 condition을 비교하기 위해, TEM-CL에서 QWs 두께에 따른 발광 세기를 비교하였고, 이를 통해 TEM-CL이 PL에서 low-excitation condition에 대응되는 것을 확인하였다. 다음으로 cross-section sample을 통해서 QWs의 내부 구조와 발광 특성 사이 관계를 밝히고자 하였으며, 시편 전체에서 발광 특성을 파악하기 위해 plan-view 시편을 이용하여 TEM-CL을 진행하였다.

실험 결과, QWs의 두께가 얇아지고 In의 함량이 적어짐에 따라 발광되는 빛이 blue shift가 되었으며, v-groove에서는 다른 지역보다 더욱 짧은 파장의 빛을 내고 있음을 확인하였다. 그리고 TEM-CL과 STEM image로 v-groove 주변 QDisk의 존재를 발견하였으며, 이 QDisk는 주변보다 energy band gap이 낮음을 확인하였다. 따라서 QDisk는 carrier를 효과적으로 capture하므로 발광효율을 높이는 작용을 하며, energy band gap이 높은 v-groove영역은 carrier의 이동을 방해하는 energy barrier로 작용하여 carrier의 delocalization을 유발하므로, carrier가 dislocation영역에서 recombination되는 것을 방해하여 LED의 효율을 높인다는 결론을 낼 수 있었다.

2. 이론적 배경

2.1 Cathodoluminescence

가속된 전자가 재료와 상호작용을 하면 구조적, 전기적, 화학적인 정보를 갖는 여러 가지 신호가 발생된다. (Fig 2.1.1) 이러한 신호들은 발생 시 빛이나 전자, 이온 등 다양한 형태를 띄며, 신호마다 서로 다른 에너지와 발생확률을 가지고 있다. 따라서 이러한 신호들을 효과적으로 감지하기 위해서는 검출하고자 하는 신호의 특성을 알아야 한다.

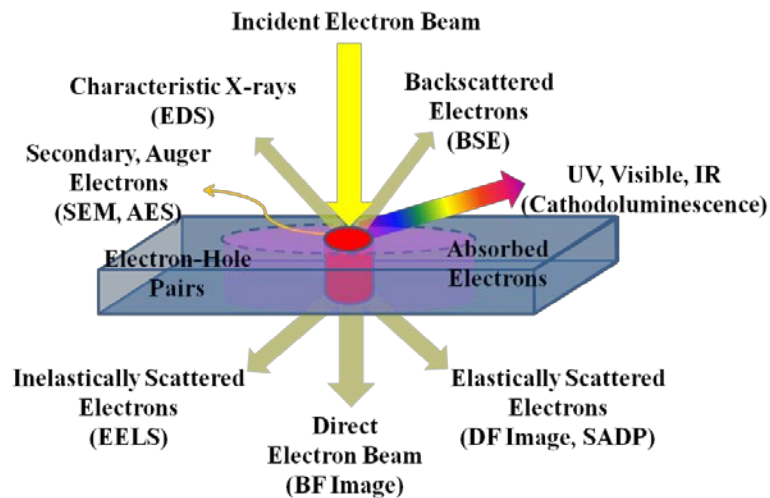


Figure 2.1.1 Various signal induced by interaction between an electron and a sample.

이러한 여러 가지 신호들 중 Cathodoluminescence (CL) 은 가속된 전자가 재료에 부딪히면서 발생하는 전자-홀 쌍이 다시 재결합되면서 발생하는 신호를 말한다. 이러한 현상으로 발생한 빛은 그 재료의 final band energy와 initial band energy의 차이만큼 파장을 갖고, UV에서 Near-IR까지 그 영역이 매우 다양하다.

위와 같은 과정으로 생성된 전자-홀 쌍의 재결합 확률은 Fermi's Golden rule을 따르며, Franck-Condon 원리에 의해 식 2.1.1처럼 표현할 수 있다.

$$\int \epsilon_f v_f \hat{x} \epsilon_i v_i d\tau_e d\tau_v = \int \epsilon_f \hat{x} \epsilon_i d\tau_e \int v_f v_i d\tau_v + \int \epsilon_f \epsilon_i d\tau_e \int v_f \hat{x} v_i d\tau_v \quad (2.1.1)$$

위 식에서 왼쪽 항을 transition dipole moment라고 하며, 이 값의 제곱 값은 재결합 확률에 비례한다. 그리고 ϵ_f , ϵ_i 는 electronic final state와 initial state이고, v_f , v_i 는 vibronic final state와 initial state이며, 이 식의 에서 $\int \epsilon_f \hat{x} \epsilon_i d\tau_e$ 은 electronic transition moment에 의한 항이고, $\int v_f v_i d\tau_v$ 은 Franck-Condon factor라고 하며, 이 항을 통해 재결합이 electron transition moment뿐 아니라 vibrational overlap에도 영향을 받음을 알 수 있다.

이와 같은 식은 핵이 전자에 비해 무거워 핵의 운동상태를 전자에 비해 정지한 것으로 가정하여 근사한 것이기 때문에, 전자의 transition은 k-space상 수직방향으로 발생하게 되는 것을 알 수 있다.

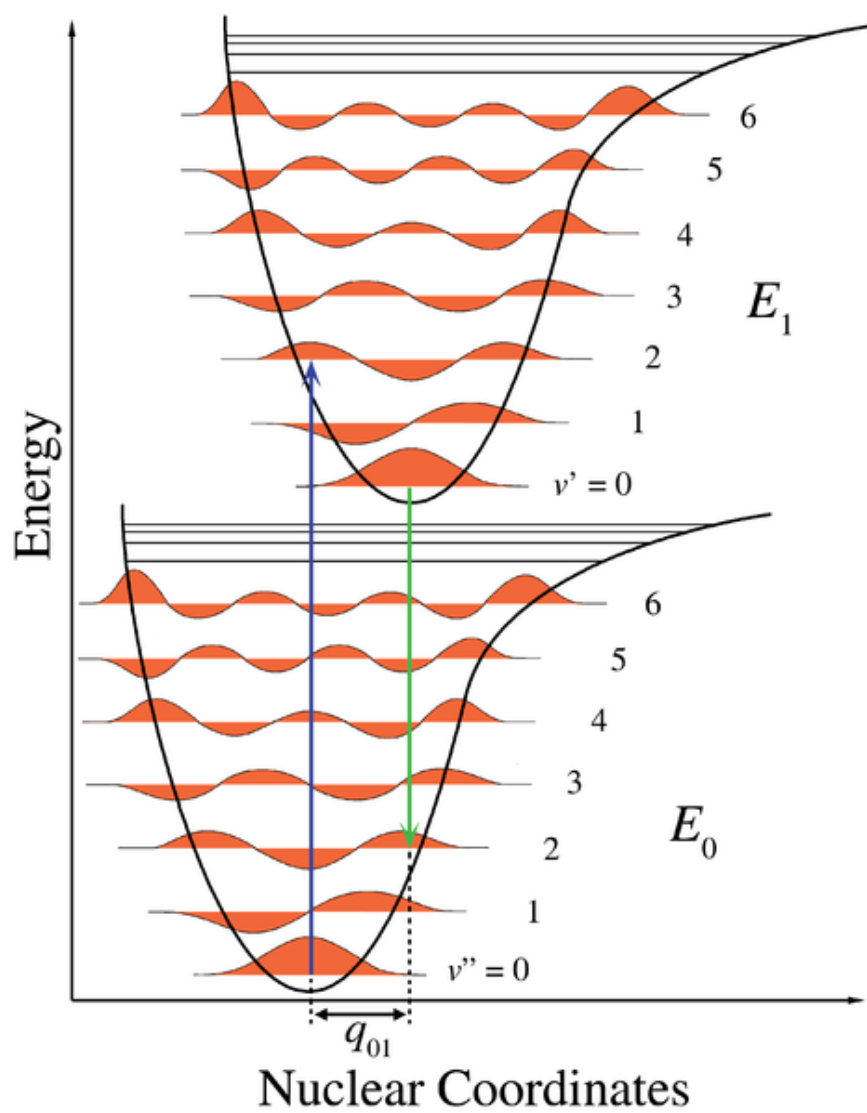


Figure 2.1.2 Franck-Condon principle energy diagram.

전자-홀 쌍의 재결합은 크게 radiative와 non-radiative recombination으로 나눌 수 있다. 일반적으로 radiative recombination은 전자-홀 쌍이 재결합되면서 여분의 에너지를 빛으로 방출하는 과정을 말하며 (Figure 2.1.3) [1], 방출되는 빛의 에너지와 파장은 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$hv = \frac{hc}{\lambda} = E_f - E_i \quad (2.1.1)$$

여기서 E_f , E_i 는 final state, initial state의 에너지이며, h 는 plank constant, λ 는 발생된 빛의 파장을 나타낸다.

이러한 과정을 통해 생성된 빛은 세부적으로 intrinsic luminescence와 extrinsic luminescence로 나눌 수 있다. 먼저 Intrinsic luminescence의 경우는 일반적으로 재료의 conduction band 와 valence band 사이 에너지 차에 의해 발생하는 빛을 말한다. 이와 달리 extrinsic luminescence는 재료 내 doping이나 결함에 의해서 재료의 band gap 사이에 생긴 state에 의해 발생하는 빛을 말한다. 이러한 state들은 결함의 종류나 doping의 종류에 따라 각자의 고유한 state를 갖기 때문에 재료 내 결함 분석하기 위해 CL을 활용한 연구가 많이 되어 왔다.

반면, Non-radiative recombination은 여분의 에너지가 빛이 아닌 다른 방식 (ex- 열, 전자, etc.) 으로 방출되는 과정을 말한다. [2] (Figure 2.1.4) 이러한 현상은 1) recombination의 에너지가 crystal lattice의 열 형태로 방출되는 경우, 2) 재료의 표면에서 존재하는 dangling bond로 인한 흡수, 3) 재료 내 결함에 의한 전자의 trap, 4) 전자가 더 높은 준위로 천이 (Auger Recombination) 가 있으며, 이러한 현상들은 소자의 발광효율을 떨어뜨리는 인자로 작용한다.

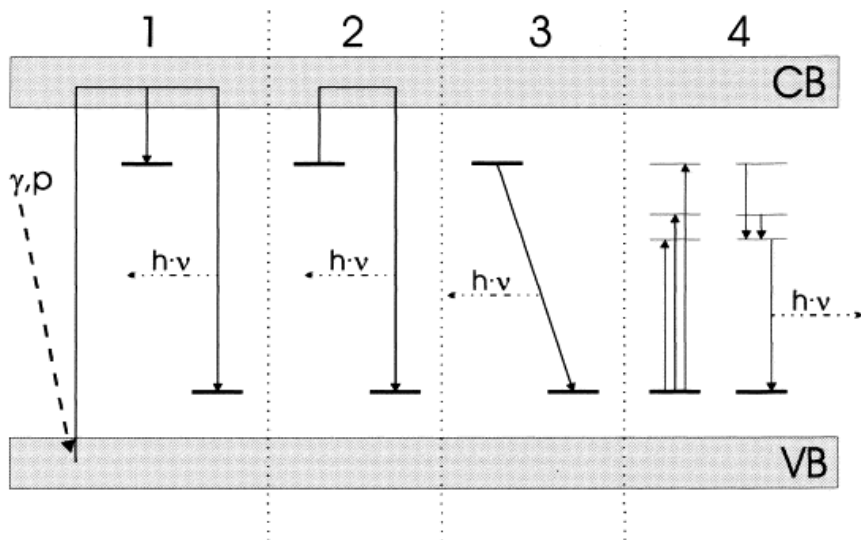


Figure 2.1.3 Processes of charge transfer and luminescence production in crystals. 1) Possible path of excited electron; a) radiative recombination, b) non-radiative recombination, 2) Radiative recombination, 3) In-direct recombination, 4) The excitation and emission of several energy levels.

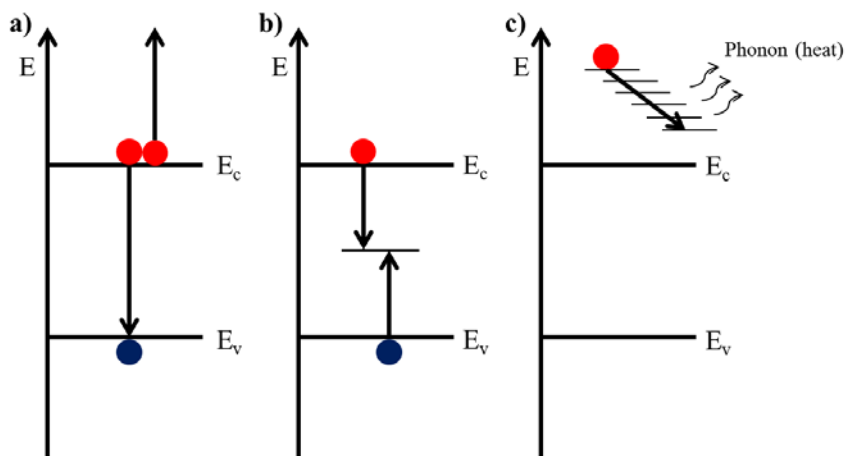


Figure 2.1.4 Processes of non-radiative recombination. a) Auger recombination, b) Shockley-Read-Hall recombination, c) Thermal relaxation.

2.2 GaN을 기반으로 한 Light Emitting Diodes

2.2.1 서론

1993년도 InGaN/GaN 소자가 발명된 후, GaN을 기반으로 제작된 LED에 관한 연구와 시장이 크게 활성화 되어 왔다. LED 소자들은 기존 조명에 비해 우수한 내구성과 낮은 전력소모 등 여러 가지 측면에서 장점을 지니고 있다. 이러한 장점들을 바탕으로 LED는 기존 조명을 대체하는 차세대 조명으로 대두되고 있으며, TV의 backlight, semiconductor laser diodes (LD) 등 많은 분야에서 수요가 빠르게 증가되고 있다. 따라서 LED가 더욱 다양한 분야에 적용되기 위해서 광 효율 증가는 필수적이며, 현재 이를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. [3]

위와 같은 연구가 진행되기 위해서는 LED 내 미세 구조와 발광 특성간 관계를 규명하는 것이 필수적이며, radiative recombination과 non-radiative recombination process에 대한 정확한 이해가 필요하다.

non-radiative recombination process 원인으로 1) Auger recombination, 2) Carrier delocalization, 3) electron leakage 등이 있다. 이러한 원인들은 LED 소자에서 고 전류 인가 시 효율이 급속하게 감소시키는 efficiency droop의 원인으로 작용하게 되므로, (figure 2.2.1) 이러한

과정을 발생시키는 원인을 밝히는 것은 LED 소자 개발에서 반드시 선행적으로 이루어 져야 할 일이다. [4, 5].

따라서 미세구조와 발광특성간 관계를 밝혀 non-radiative 과정을 억제하는 구조에 대한 방향을 제시한다면, 고효율, 고성능의 LED 제작이 가능할 것으로 생각된다.

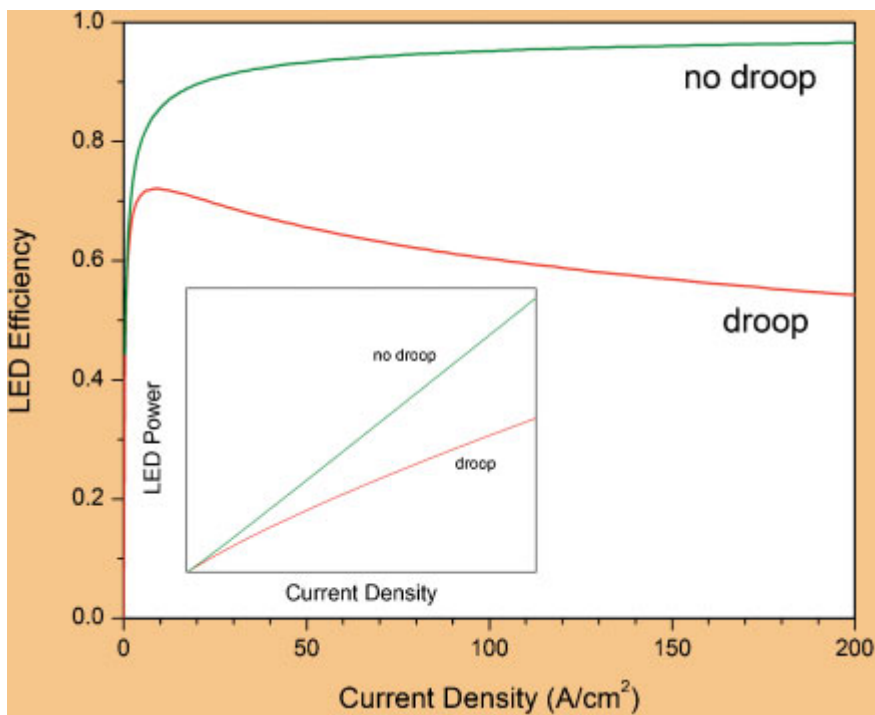


Figure 2.2.1 Illustration of LED efficiency droop.

2.2.2 LED 효율

주입한 전자가 모두 빛으로 발생되는 경우, LED 소자는 100% 효율을 보일 수 있다. 그러나 전자가 빛으로 바뀔 때 언제나 에너지 손실이 발생한다. 따라서 이러한 에너지 변환의 정도를 알기 위해, 식 2.2.1을 사용하여 에너지 변환 효율을 정량적으로 계산한다. [4,6]

$$\eta_{IQE} = \frac{I_{rad}}{I} = \frac{I_{rad}}{(I_{rad} + I_{lost})} \quad (2.2.1)$$

위 식에서 η_{IQE} 는 내부 양자 효율이고, I 는 전체 주입된 전류, I_{rad} 는 빛으로 전환된 전류, I_{lost} 는 빛이 아닌 다른 형태로 변환된 전류이다. 대부분 droop 현상과 발광 효율 저하는 I_{lost} 에 의한 영향을 받기 때문에, LED의 효율을 높이기 위해서는 I_{lost} 에 관한 원인을 밝혀야 한다.

일반적으로 Quantum Wells (QWs) 내부의 I_{lost} 는 non-radiative recombination 과정으로 인해 발생되며, 재료 내부 결함에 관련된 Shockley-Read-Hall (SRH) recombination (I_{SRH})와 Auger recombination (I_{Auger})가 이에 속하며, [4, 7] QWs 외부적인 요인으로는 current leakage (I_{leak})가 있다. 따라서 LED에서 주입 전류는 총 4 개의 부분으로 분리되며, 식 2.2.2와 같이 표현된다.

$$I = I_{rad} + I_{SRH} + I_{Auger} + I_{leak} \quad (2.2.2)$$

QW 내부 carrier recombination에 관련하여 radiation, Auger recombination, SRH recombination을 변수로 하여 간단하게 ABC model로 식 2.2.3와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{QW} = I_{rad} + I_{SRH} + I_{Auger} = qV_{QW}(An + Bn^2 + Cn^3) \quad (2.2.3)$$

여기서 V_{QW} 는 모든 QWs의 부피이고, n 은 전류밀도, A 는 SRH

parameter, B는 radiative coefficient, C는 Auger coefficient이다. [4] leakage current에 관하여 Özgür et al.는 전체 전류밀도와 관계된 수식을 제안하였으며, I_{leak} 은 식 2.2.4와 같이 표현된다.

$$I_{leak} = aI_{QW}^m \quad (2.2.4)$$

위에서 표현되었던 식을 내부양자효율로 다시 표현하면 식 2.2.5와 같이 표현되며, 이 식은 LED의 효율을 정량적으로 계산할 때 널리 사용된다.

$$\eta_{IQE} = \frac{qV_{QW}Bn^2}{(I_{QW} + aI_{QW}^m)} \quad (2.2.5)$$

따라서 LED의 효율을 높이기 위해서는 QWs의 부피를 크게하고, carrier의 농도를 높여야 하며, leakage current를 줄이고 non-radiative recombination에 의한 current loss를 억제해야만 한다.

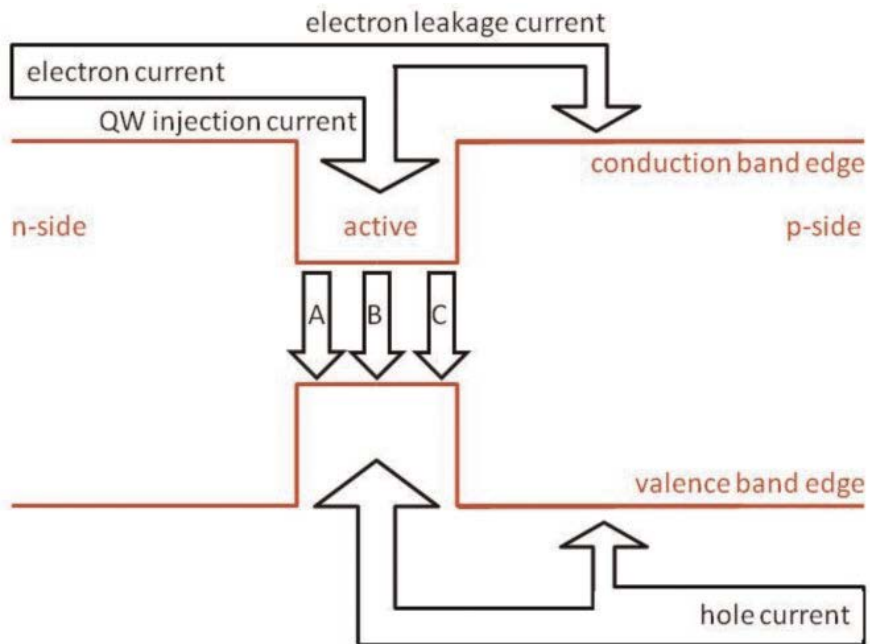


Figure 2.2.2 Schematic illustration of LED current component (A – SRH recombination, B – spontaneous recombination, C – Auger recombination).

2.2.3 Non-radiative recombination

Non-radiative recombination은 LED뿐 아니라 많은 반도체 소자의 성능에 영향을 미치는 인자로 작용한다. 이 현상은 luminescence 현상을 억제하고, carrier lifetime을 줄이는 등 반도체 물성에 많은 영향을 주며, 일반적으로 반도체 장치에서 이러한 현상은 대부분 효율을 감소시키는 인자로 작용한다. [9]

반도체 소자의 내부 양자 효율은 lifetime에 의해서 표현이 되며, radiative lifetime과 non-radiative lifetime의 조합으로 표현될 수 있다.

$$\eta_{IQE} = \frac{\text{radiative rate}}{\text{total recombination rate}} = \frac{\tau_{rad}^{-1}}{\tau_{rad}^{-1} + \tau_{nr}^{-1}} = \frac{\tau_{nr}}{\tau_{rad} + \tau_{nr}} \quad (2.3.1)$$

여기서 τ_{rad}, τ_{nr} 은 radiative, non-radiative lifetime이며, τ_{rad} 가 τ_{nr} 에 비하여 매우 작은 값을 가져야 최대 효율을 보인다. [8] 이러한 non-radiative life time은 재료의 doping, defects 등에 영향을 받으며, doping 농도와 defect가 생성하는 energy level에도 영향을 받는다.

$$\tau = \frac{1}{s} e^{E_t/k_b T} \quad (2.3.2)$$

여기서 s 는 frequency factor이며, T 는 절대온도, E_t 는 trap의 깊이이다. [1, 11] 실제 InGaN/GaN LED에서 내부 양자 효율을 구하기 위해, lifetime을 이용하기도 하며, QW가 만든 우물의 깊이의 에너지와 defect에 의해 만들어진 에너지 준위에 따라서 lifetime이 달라진다고 보고된바 있다. [10]

반도체 소자의 내부 양자 효율에 영향을 주는 non-radiative recombination은 defect뿐만 아니라, Auger effect에 의해서도 영향을 받는다. Auger effect는 carrier의 농도가 높을 경우에 자주 되고, Auger process에는 band-band auger effect, trap을 통한 auger transition등이

있다. 먼저 band-band auger effect는 figure 2.2.3 a)처럼 나타낼 수 있으며, 이 현상은 전자들 사이 충돌로 인해 하나의 전자는 에너지를 얻어 더 높은 state로 천이하고, 다른 하나의 전자는 에너지를 잃는 과정으로 설명된다. band-band Auger effect는 온도와 상관관계가 보이고 있으며, 이런 현상이 나타나기 위한 threshold energy가 존재하고 에너지 밴드 갭이 클수록 감소하는 경향을 보인다.

Figure 2.2.3 b)는 phonon assisted auger recombination으로, band-band auger effect와 달리 auger process에 필요한 threshold energy가 없어서 온도에 무관한 관계를 보인다. Figure 2.2.3 c)는 trap level을 통한 auger recombination이다. 이 것의 확률은 trap의 깊이가 증가함에 따라 급격하게 증가하며, electron이나 hole이 trap될 확률은 trap을 유발하는 인자 (ex- surface, defect 등)에 영향을 받는다. 이러한 여러 가지 auger process들에 의한 auger coefficient C 를 구하기 위해, Photoluminescence (PL), Electro-luminescence (EL) 등의 여러 가지 방법들이 사용되었다. [13, 14, 15]

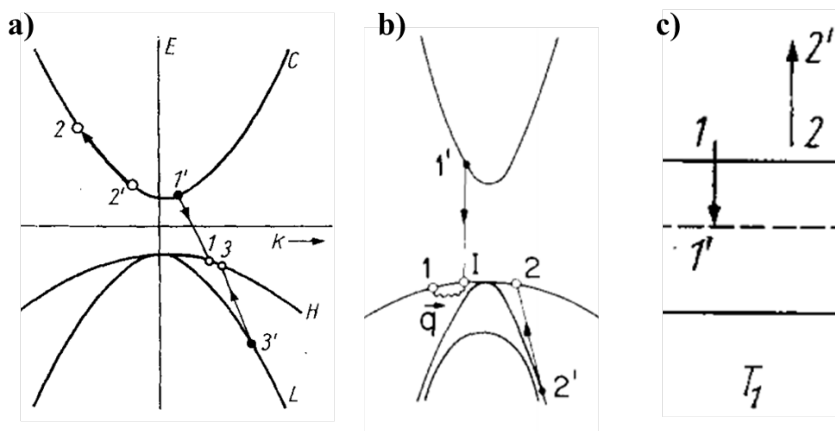


Figure 2.2.3 Auger processes a) Phonon-less band-band Auger process, b) Phonon-assisted Auger process, c) Auger process via trap.

재료 표면에서 dangling bond의 존재는 trap energy level을 형성하여 non-radiative center를 생성한다. 이로 인해 형성된 level로 인하여 surface recombination이 발생하게 되며, surface to volume 비율이 큰 나노 물질에서 내부 양자 효율을 떨어트리는 주요 요인으로 작용한다. 반도체에서, 이러한 recombination rate는 SRH theory로 계산이 되며, 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$U_s = (n_s p_s - n_1^2) \times v_{th} \int_{E_v}^{E_c} \frac{D_{it}(E_t)}{(n_s + n_1) / \sigma_p(E_t) + (p_s + p_1) / \sigma_n(E_t)} dE \quad (2.3.3)$$

여기서 $n_1 = n_i e^{(E_t - E_i)/kT}$, $p_1 = p_i e^{(E_i - E_t)/kT}$ 이고, n_s, p_s 는 surface에서 전자와 홀의 농도, E_t 는 trap의 energy level, E_i 는 intrinsic Fermi level, v_{th} 는 carrier의 열적 속도, D_{it} 는 interface state density, σ_n, σ_p 은 전자와 홀의 capture cross section이다. 따라서 소자의 효율을 높이기 위해 passivation 과정을 통해 dangling bond의 밀도를 줄이면, D_{it} 가 줄어들게 되므로 surface recombination에 의한 에너지 손실을 줄일 수 있게 된다. [16, 17]

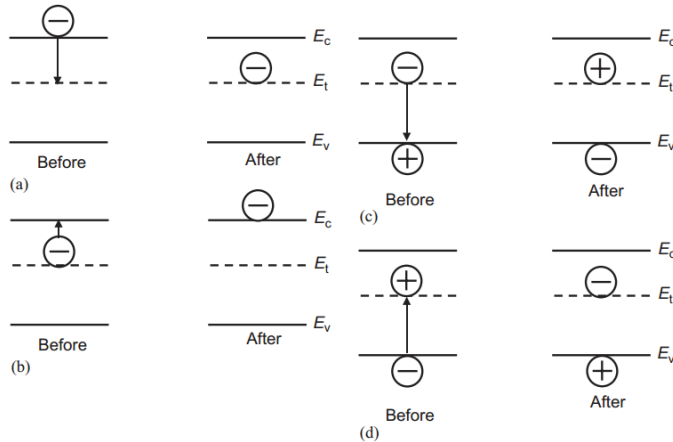


Figure 2.2.4 Steps of the recombination-generation processes through intermediate-level centers: (a) electron capture, (b) electron emission, (c) hole capture, (d) hole emission.

SRH theory는 surface recombination뿐만 아니라 재료 내 defect로 인해 생성된 energy level에 의한 recombination을 설명하는데도 이용된다.

만약 steady state라면 trap에 의한 recombination rate는 다음과 같이 표현되고,

$$-U = R_a - R_b = R_c - R_d = \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} N_t (pn - n_i^2)}{\sigma_n [n + n_i \exp\{-(E_t - E_i)/kT\}] + \sigma_p [p + n_i \exp\{-(E_i - E_t)/kT\}]} \quad (2.3.4)$$

$\sigma_p = \sigma_n = \sigma$ 를 만족할 경우, 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$-U = \sigma v_{th} N_t \frac{(pn - n_i^2)}{n + p + 2n_i \cosh((E_t - E_i)/kT)} \quad (2.3.5)$$

여기서 $(pn - n_i^2)$ 는 평형상태로부터 carrier 농도의 편차를 나타내고 있다. 따라서 이 값이 높으면 recombination rate는 증가하게 되므로 이 값은 recombination의 driving force가 된다.

반면, 분모의 $(n + p)$ 의 값이 증가하면 recombination rate는 감소하게 되며 이 것은 recombination process에서 recombination의 저항으로 작용한다. 또한 cosine hyperbolic항은 $E_t = E_i$ 를 기준으로 그 값이 대칭이며, $E_t = E_i$ 일 때 recombination rate가 가장 높은 값을 갖고, recombination center는 E_i 주변에서 형성이 된다. 그리고 이러한 과정들은 온도가 상승함에 따라 더 잘 나타난다. [17, 18]

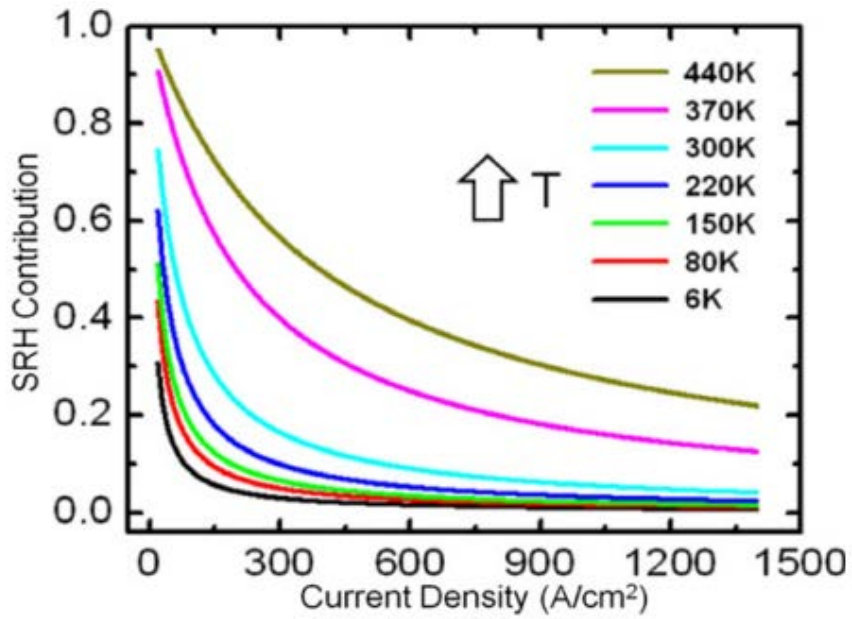


Figure 2.2.5 Plot of the SRH recombination contribution versus injection current in the temperature range of 6-440 K.

2.3 Piezoelectric field

단파장의 광 소자를 개발하기 위해서 InGaN/GaN hetero-structure가 많이 채택되고 있다. 이러한 소자가 (0001)방향으로 결정이 성장할 경우, InGaN/GaN의 계면에서 lattice mismatch에 의해서 강한 strain이 생긴다. 이렇게 발생한 strain은 wurtzite structure에서 강한 piezoelectric field를 유발하게 되며, 이로 인하여 Quantum Confined Stark Effect (QCSE)가 유발된다. QCSE는 QW내 전자와 홀을 공간적으로 분리시켜 wave function이 overlap이 되지 않도록 하여 recombination rate를 줄일 뿐 아니라, 발광하는 빛을 red shift시키기도 한다. [5, 19, 20, 21, 22]

T.Takeuchi et al.은 InGaN/GaN hetero-structure에서 소자의 성장 방향에 따른 piezoelectric field 세기와 transition 확률을 제시하였으며, [22] 이를 활용하여 소자의 성장 방향을 바꿔 piezoelectric field를 작게 만들면 droop 현상의 개선되고, 발광효율도 상승되는 것으로 알려져 있다. [23]

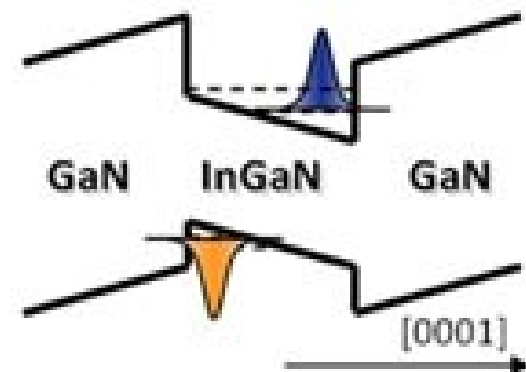


Figure 2.2.6 Schematics of the quantum confined stark effect in InGaN/GaN hetero-structure.

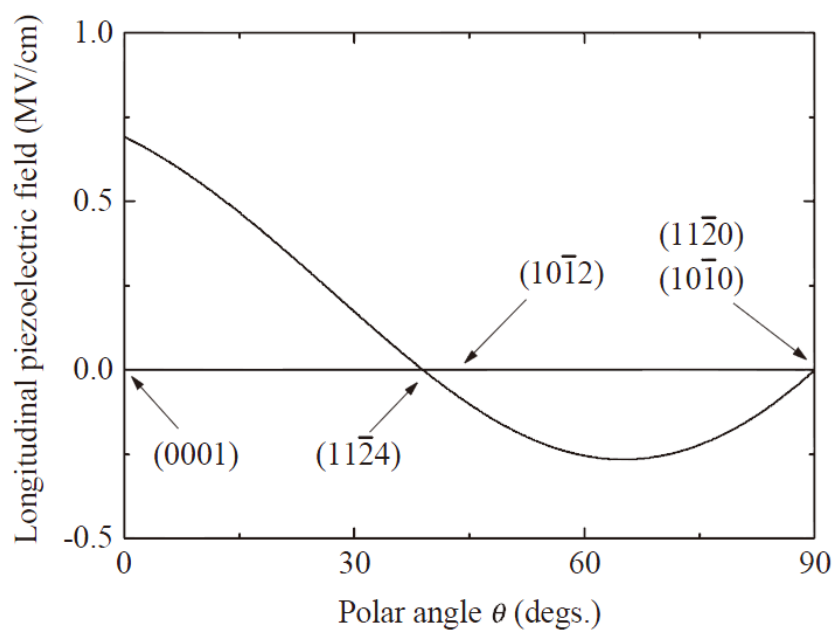


Figure 2.2.6 Calculated longitudinal piezoelectric field in strained InGaN on GaN as a function of the polar angle from (0001).

3. 실험방법

3.1 TEM 시편준비

TEM-CL을 하기 위해 Samsung LED에서 일반 상업용으로 판매되고 있는 Bulb SI-I7R121140KR에서 LED chip을 추출하였다. 그리고 STEM과 EDS를 이용하여 LED 내 미세구조와 원소분포에 대한 이미지를 얻었다. Sample은 Figure 3.1.1와 같이 n-GaN 위에 약 1.5 nm의 InGaN과 4 nm의 GaN이 반복되는 Super Lattice (SL) 층과 약 3 nm의 InGaN과 4 nm의 GaN가 반복되는 active layer, 그 위에는 3 nm의 AlGaN과 4 nm의 GaN이 반복되는 Electron Blocking Layer (EBL)이 있으며, 약 45 nm 두께의 p-GaN층이 있고, 그 위에는 전극 형성을 위해 ITO층과 절연층으로 구성이 되어 있다.

TEM sampling 시 FIB를 이용하여 TEM-CL sample을 준비하게 되면, Ga ion에 의한 damage로 인하여 non-radiative recombination center가 생성되므로, TEM-CL을 진행하기 위해 모든 sample은 mechanical polishing을 한 후 Argon ion (Ar^+) milling을 하여 준비하였다. 그러나 Ar^+ milling을 진행하여도 Ar^+ beam에 의한 damage는 존재하므로, non-radiative center 생성을 최소화하기 위해서 Ar^+ milling 시간을 짧게 하고, Ar^+ milling 진행 시 LN_2 냉각을 이용하여 sample에서 milling동안 발생할 수 있는 thermal damage를 최소화 하였다.

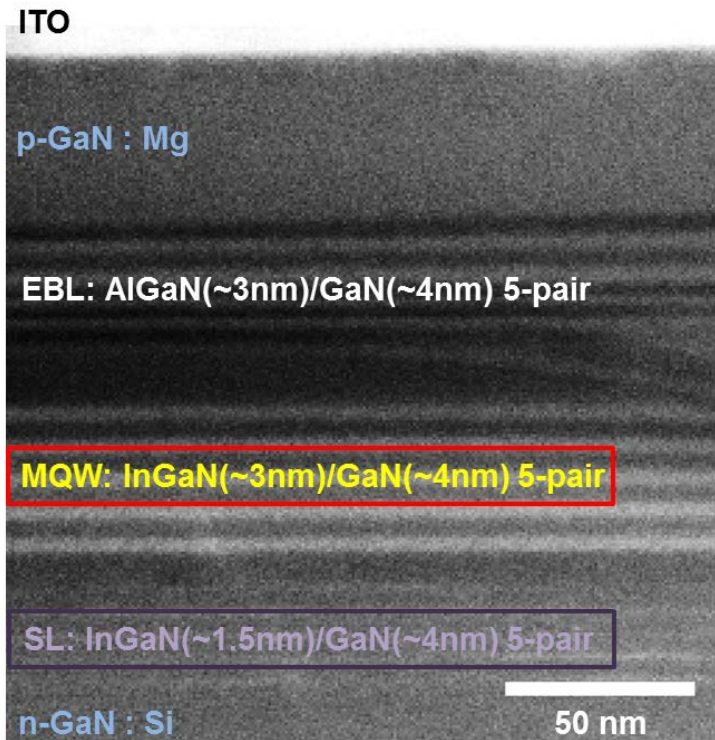


Figure 3.1.1 STEM image of Structure of LED chip.

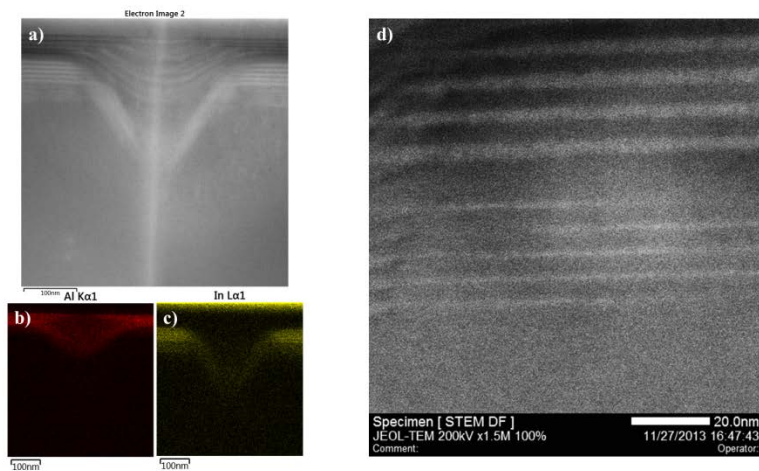


Figure 3.1.2 a) STEM image of QWs around v-groove in LED, b) EDS mapping image by Al, c) EDS mapping image by In, d) high magnification image of QWs.

3.2 TEM-CL

TEM-CL 실험에 사용된 시스템은 figure 3.2.1과 같다. 이 시스템은 LN_2 를 이용한 냉각시스템이 결합된 TEM-CL holder 형태이기 때문에, TEM 관찰 시 나타날 수 있는 irradiation damage가 줄어들므로 non-radiative recombination center의 발생률을 최소화할 수 있다. 또한 sample의 냉각효과는 minority carrier diffusion length가 짧게 만들어 CL spatial resolution을 상승시키는 효과를 만든다.

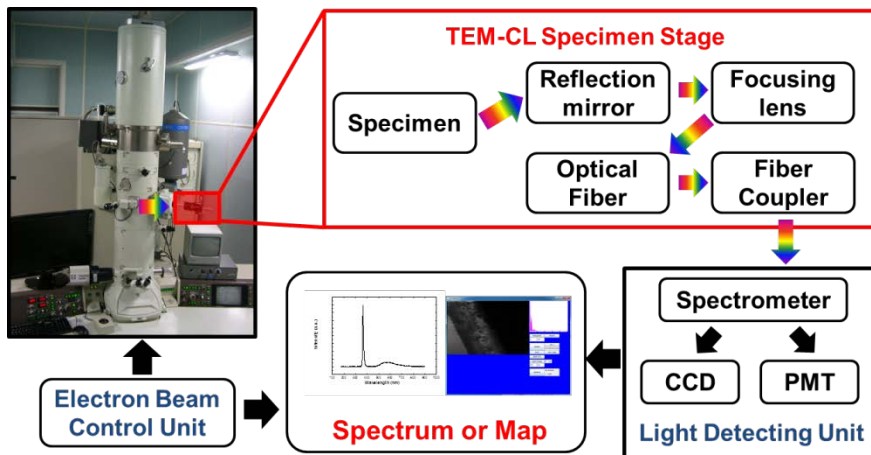


Figure 3.2.1 Schematic of TEM-CL System

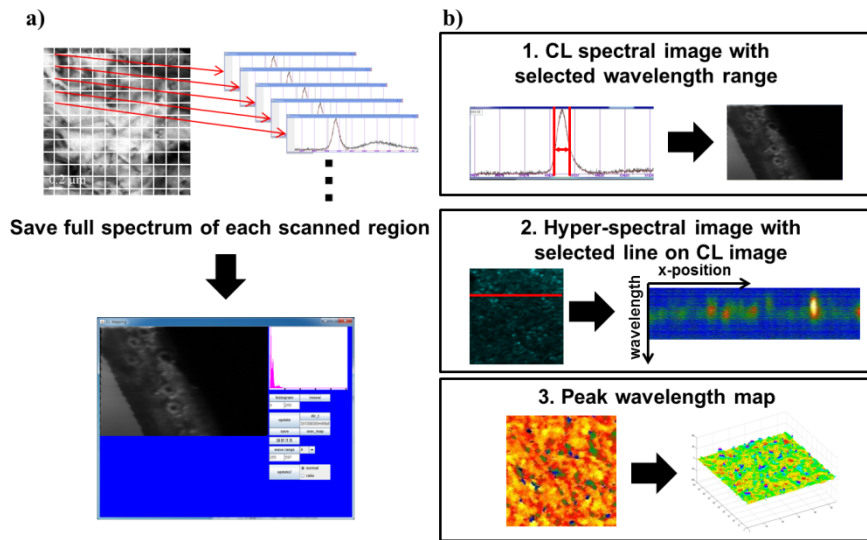


Figure 3.2.2 Schematic of S/W functions and image production processes a) schematic of image production process, b) introduction of S/W functions.

TEM 내 가속전압이 매우 높을 경우 beam damage때문에 non-radiative recombination center가 생성되므로, [24] TEM의 가속전압을 120kV로 하여 TEM-CL을 진행하였다.

TEM 내 생성된 CL 신호는 optical fiber를 통해 TEM 외부에 있는 spectroscopy로 도달하게 되며, 이러한 신호들은 manually developed software를 통해 신호처리과정을 거치게 된다. 그리고 여러 가지 방법의 신호처리 과정 후 생성된 데이터들은 분석 목적에 맞게 이미지로 생성되며, (ex – panchromatic image, monochromatic image, line scan image, peak center wavelength map, etc.) 이렇게 생성된 image는 Bright Field (BF) TEM 이미지나 STEM 이미지를 비교하여 재료 내부의 미세구조와 발광특성을 비교하는데 이용된다.

3.3 Signal process via S/W

Spectroscopy를 통해 얻어진 데이터들은 software에서 분석목적에 적합한 algorithm을 거쳐 이미지를 생성하게 된다. 예를 들면, Panchromatic image의 경우 sample에서 발생한 모든 CL 신호의 세기를 이용하여 이미지를 형성한다. 이 경우는 국부적인 영역에서 CL 신호의 발생 정도는 알 수 있으나, 신호가 어떠한 이유로 인하여 생겼는지에 대한 정보는 알 수 없다는 단점이 있다. 따라서 특정 wave range에 대한 이미지를 구성하고 싶은 경우에는, 전체 범위의 spectrum (300 – 700nm)을 얻은 후 window를 설정하여 특정 wave range에 대한 이미지를 구성하는 algorithm을 사용하게 된다. (figure 3.2.2)

또한 국부적인 영역에서 얻어진 peak의 shift나 broadening을 알기 위해서, figure 3.2.3처럼 특정 범위 내 Gaussian fitting이 가능하도록 하였다.

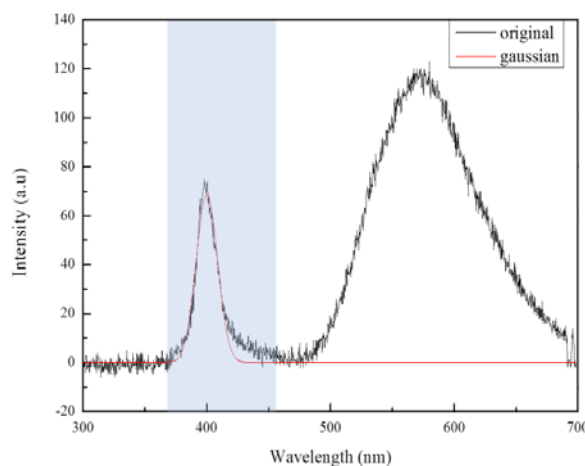


Figure 3.2.3 Gaussian fitting from 380nm to 465nm through S/W.

4. 실험 결과

4.1 LED 소자 내 QWs의 발광특성

QWs 내 발광특성을 알아보고자 cross-section sample을 이용하여 figure 4.1.1 a) 구역에서 TEM-CL을 진행하였다.

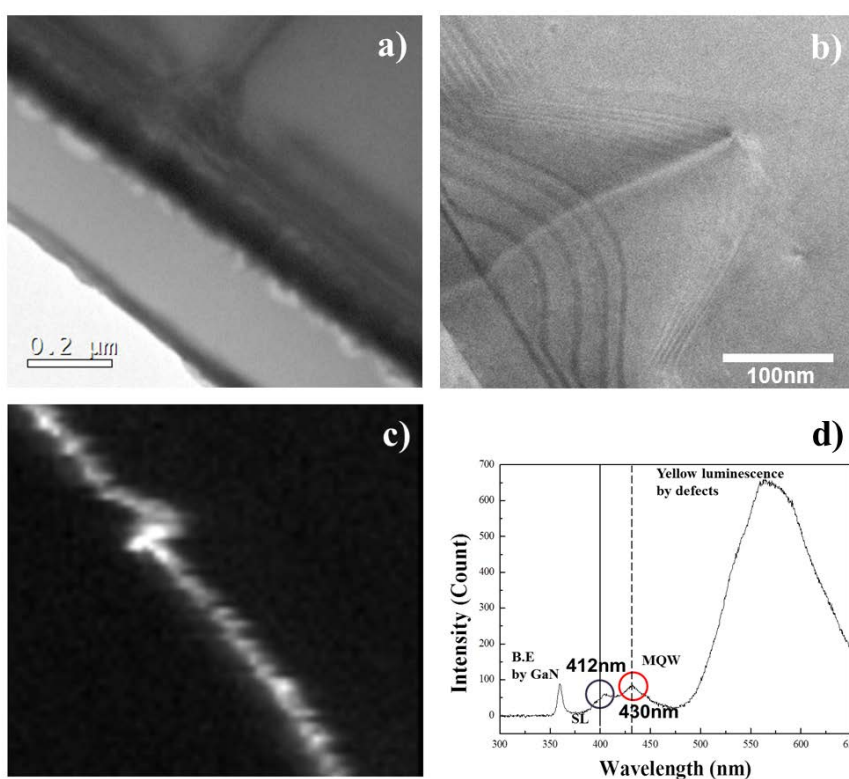


Figure 4.1.1 CL mapping area a) cross-sectional BF image, b) cross-sectional STEM image from v-groove area in a), c) panchromatic CL image : integration range from 380 nm to 465 nm, d) CL spectrum of LED.

그 결과 InGaN이 포함된 QWs에서는 발광에 의한 신호를 감지할 수 있었지만, AlGaN이 포함된 QWs에서는 이러한 신호를 감지할 수

없었다. 그리고 Figure 4.1.2 b) 처럼 QWs의 두께나 In의 함량, 미세구조에 따른 발광영역이 다르게 나타났으며, QWs의 두께가 얇아지고 In의 함량이 낮아질수록 blue shift되는 경향을 보였다. 또한 ITO층에서는 ITO 내 defects에 의한 yellow luminescence (565-575 nm)를 관찰할 수 있었다. [25] 그리고 figure 4.1.3처럼 QW의 두께가 얇아짐에 따라 CL intensity가 강하게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 InGaN층에 piezoelectric field가 있을 경우, QWs 두께가 exciton의 Bohr radius (a_B)보다 작아질수록 전자와 홀의 wave function overlap정도가 커지기 때문에 나타나는 현상이다. [20, 21] 이러한 현상은 PL 실험 시 low-excitation 결과와 동일한 하므로, TEM-CL은 PL의 low-excitation condition에 대응된다고 할 수 있다.

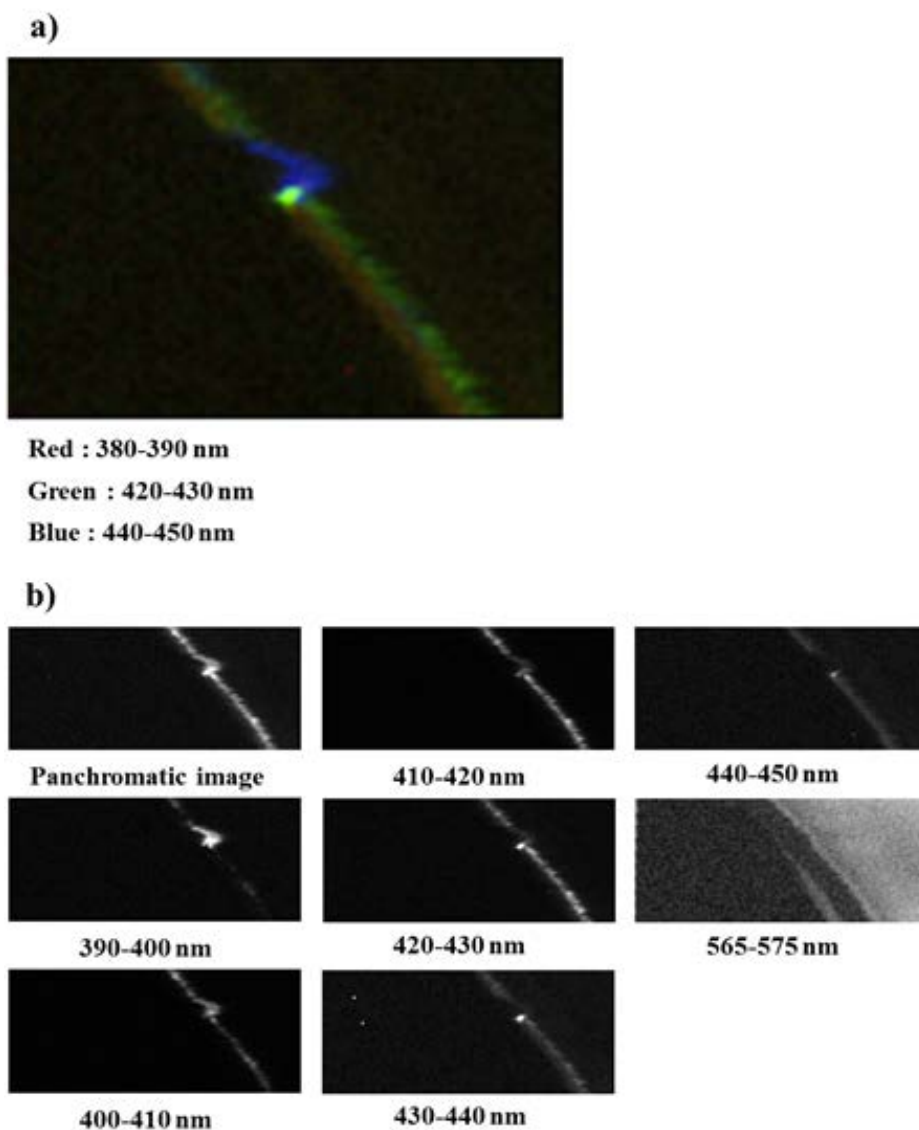


Figure 4.1.2 a) color mix CL image composed with CL monochromatic images, b) monochromatic CL images dependence on each range.

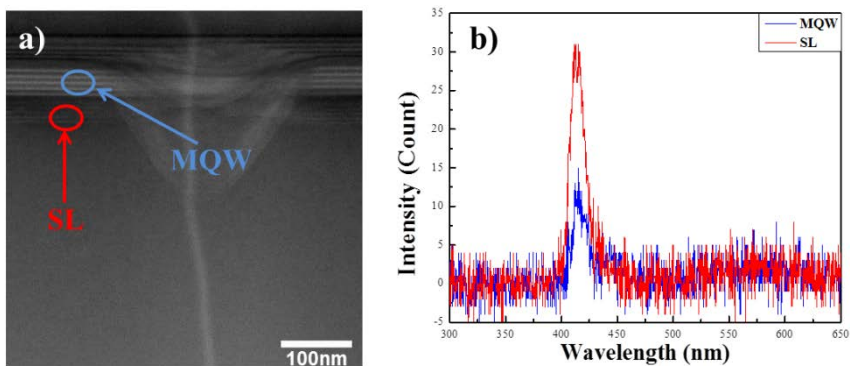


Figure 4.1.3 a) STEM image of v-groove, b) CL spectrum of SL and MQW.

High electric field in QWs








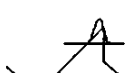
	$L < a_B$	$a_B < L \ll 3D$
$F \times L < \Delta E_v$	<p>CASE I</p>  <p>QW exciton QCSE</p>  <p>zero Stokes-like shift</p>	<p>CASE III</p>  <p>e-h tunneling (separate weak confine) QCSE+QCFK</p>  <p>Stokes-like shift (vertical+FK)</p>
$F \times L > \Delta E_v$	<p>CASE II</p>  <p>QW e-h pair <exciton?> (vertical hole localization) QCSE+QCFK</p>  <p>Stokes-like shift (vertical)</p>	<p>CASE IV</p>  <p>e-h tunneling (separately confined) QCSE+QCFK</p>  <p>Stokes-like shift (ver.+FK)</p>

Figure 4.1.4 Schematic band diagrams of InGaN/GaN QWs under the electric field F .

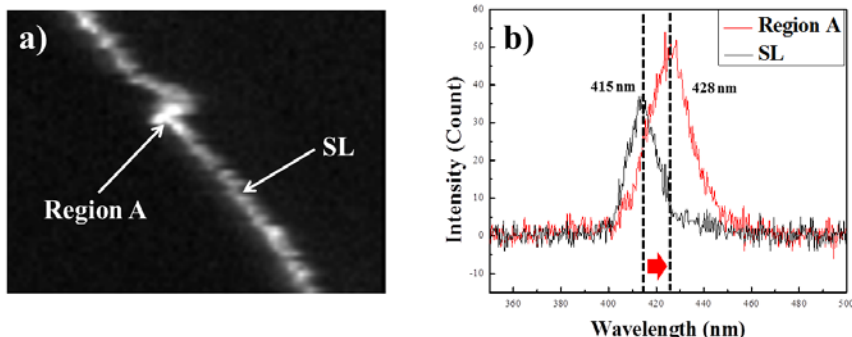


Figure 4.1.5 a) CL monochromatic images, b) CL spectrums of A and B region.

Figure 4.1.2에서 420 nm 이상의 monochromatic image을 보게 되면, v-groove edge부근에서 intensity가 강화된 영역을 쉽게 발견할 수 있다. 이와 같이 intensity가 강화된 A 지역의 spectrum은 SL 지역에 비해 emission center가 red shift가 되어있으며, SL에 비해 CL intensity가 더 높게 나타났다.

위와 같은 현상의 이유로는 1) In rich quantum dot (QD) or quantum disk (QDisk) 의 생성, 2) 국부적인 QWs 두께 증가, 3) QWs 내 In 함량의 증가를 있을 수 있다. 이러한 이유를 설명하기 위해 v-groove 주변에서 STEM 이미지를 얻은 후 CL 데이터와 비교 분석을 진행하였다. 그 결과 figure 4.1.6에서 보이는 것처럼 v-groove 주변에서 QWs의 두께차이가 뚜렷하게 나타나지 않았으며, QWs의 edge 부근에서 z-contrast에 의한 차이가 뚜렷하게 보이지 않았으나 특정 edge 부근에서 밝은 QDisk 형상이 관찰되었다. 따라서 red shift의 원인으로 2), 3)은 부적절하며, 1)이 가장 적절하다는 결론을 내릴 수 있었다. 이러한 현상의 원인은 QDisk의 size가 매우 작아 전자-홀 쌍의 wave function overlap이 QWs보다 잘 일어나기 때문에

intensity 강화가 발생하였고, QDisk 내 In 함량이 높아짐에 따라 energy band gap이 낮아진 것으로 해석된다. [3, 11, 21] 이러한 QDisk의 분포를 c축 평면상으로 알아보기 위해 plan-view 시편을 이용하여 TEM-CL을 진행하였다.

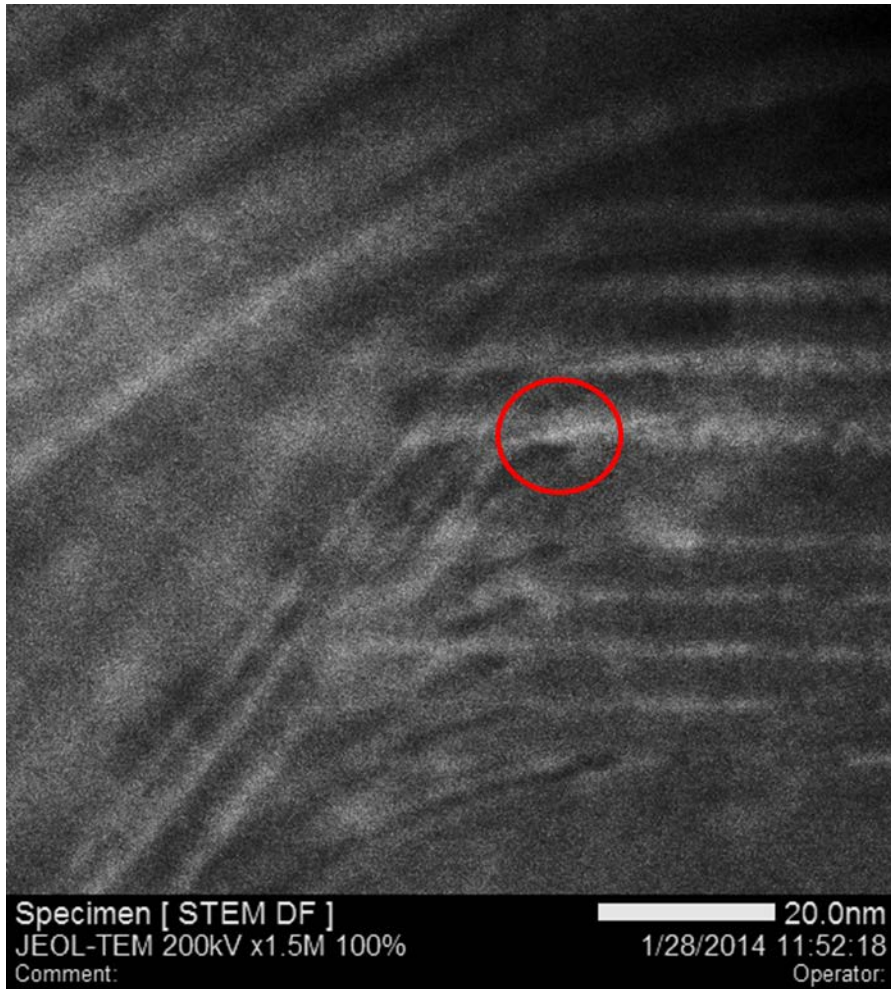


Figure 4.1.6 STEM image of QWs edge region.

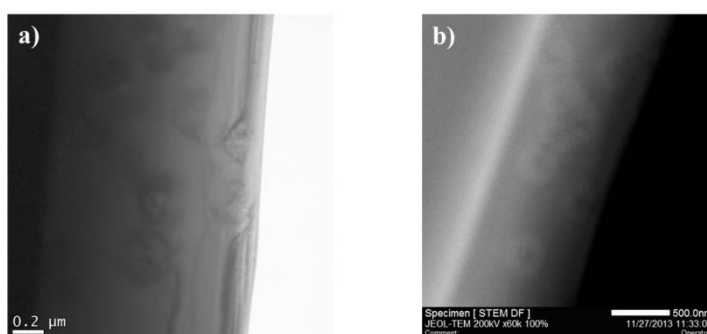


Figure 4.1.7 a) plan-view BF image, b) plan-view STEM image.

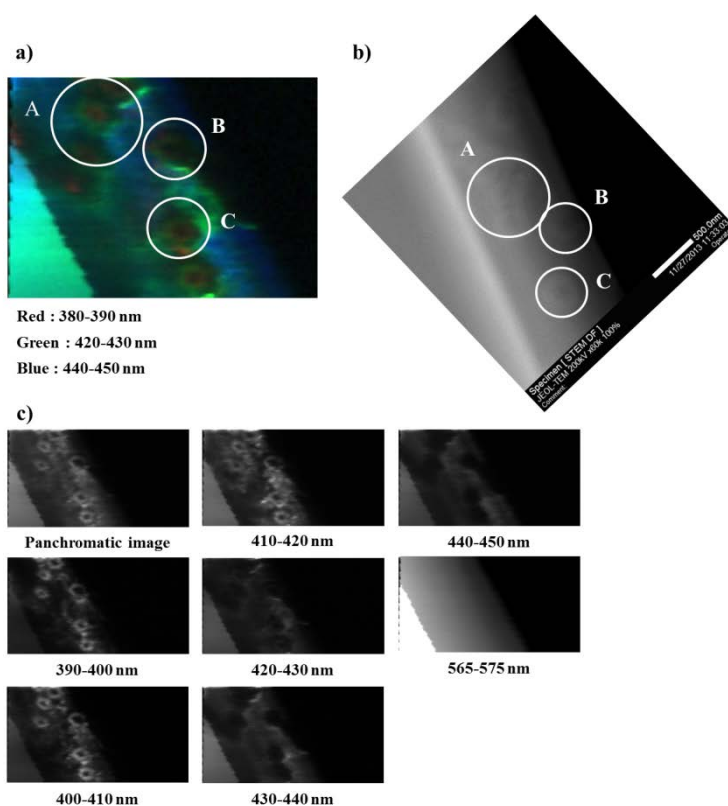


Figure 4.1.8 a) color mix CL image composed with CL monochromatic images, b) STEM image of CL scanning region, c) monochromatic CL images dependence on each range.

그 결과 figure 4.1.9에서 보는 것처럼 plan-view상에서도 v-groove edge 주변에서 장파장의 빛이 나오는 것으로 확인하였으며, (A, B, C region) 나오는 파장과 intensity는 그 구역마다 차이가 있었으나 QDisk이 존재하는 구역에서는 공통적으로 430 nm 부근에서 나옴을 확인하였다.

결과적으로 QDisk은 QWs보다 에너지적으로 낮아서 non-radiative center로 이동하는 carrier들을 효율적으로 capture할 수 있기 때문에, non-radiative recombination rate를 줄여 LED의 효율을 증가시키는 역할을 한다. [3, 9, 21]

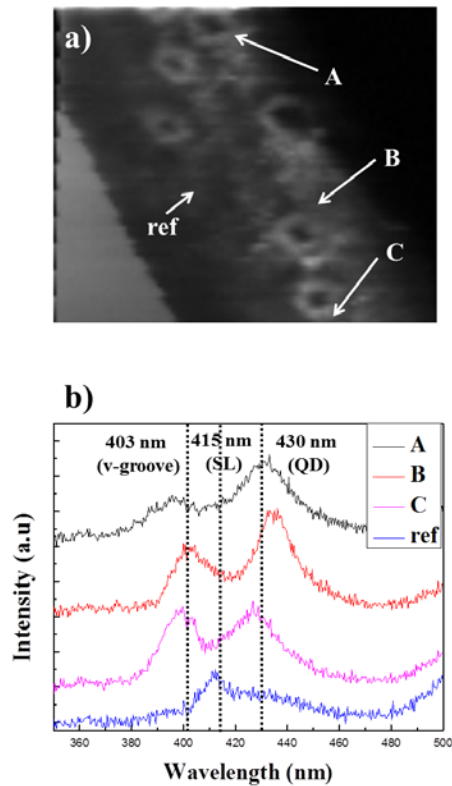


Figure 4.1.9 a) CL monochromatic image, b) CL spectrums of A, B, C and ref region.

4.2 v-groove 주변의 발광특성

v-groove 주변 발광 특성을 파악하기 위해 CL panchromatic image 내 line scan을 진행하였다.

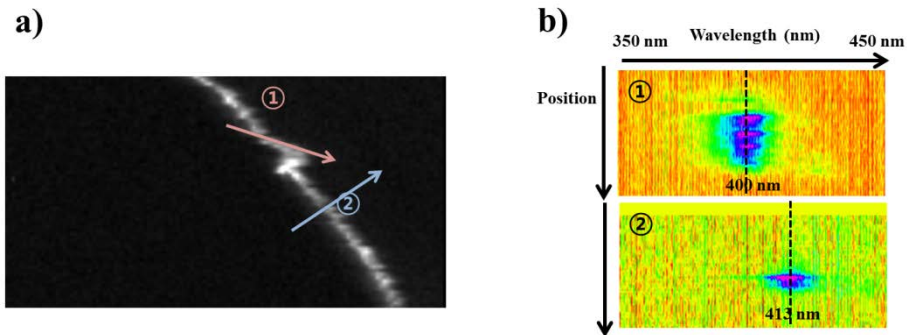


Figure 4.2.1 a) Line scan area in panchromatic CL image, b) Line scan image of red and blue line in a).

Figure 4.2.1처럼 v-groove 주변에서는 일반적인 QWs보다 단파장의 빛이 나오고 있었다. 이러한 원인에 대해서 1) QWs의 두께에 따른 quantum confinement effect, 2) In함량의 감소, 3) v-groove의 (11̄01)면에서 생성되는 piezoelectric field 크기가 (0001)면보다 작아 QCSE가 줄었기 때문이라고 보고하고 있다. [11, 22, 26] 그러나 low excitation condition의 경우에는 piezoelectric field에 의한 효과가 매우 작으므로, [21] quantum confine effect와 In 함량에 대해서 고려하여 분석을 진행하였다. 먼저 STEM을 이용하여 v-groove 주변에서 이미지와 얻은 후 v-groove에서 QWs 두께를 측정하고, EDS결과를 이용하여 In함량 변화를 관찰하였다. 그 결과, v-groove주변에서 QWs의 두께가 약 1.2 nm로 얇아졌으며, In의 함량이 QWs에 비해 줄어든 것을 확인하였다. 따라서 v-groove 주변 단파장으로 blue

shift는 quantum confinement effect와 In함량 감소로 인한 효과가 복합적으로 나타난 것으로 판단된다.

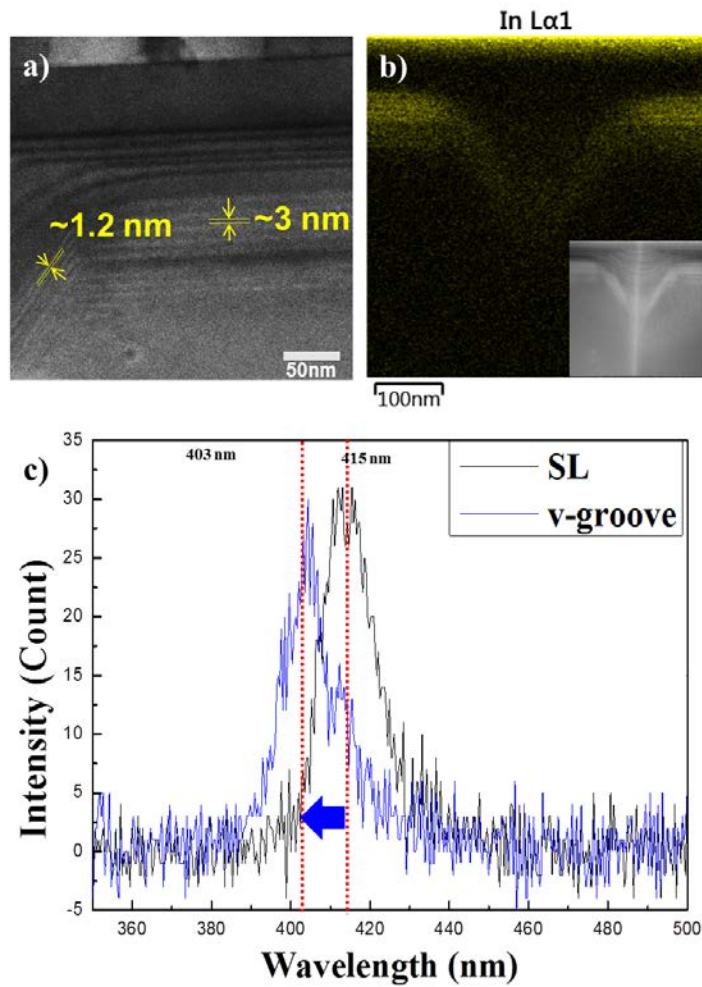


Figure 4.2.2 a) Estimation QWs thickness of $(1\bar{1}01)$ and (0001) , b) EDS mapping image by In, c) CL spectrum of SL and v-groove.

위 결과를 통해, 시편 전체에서 v-groove 영향으로 인한 에너지 밴드 분포를 파악하기 위해 band gap energy 3D reconstruction을 진행하였다.

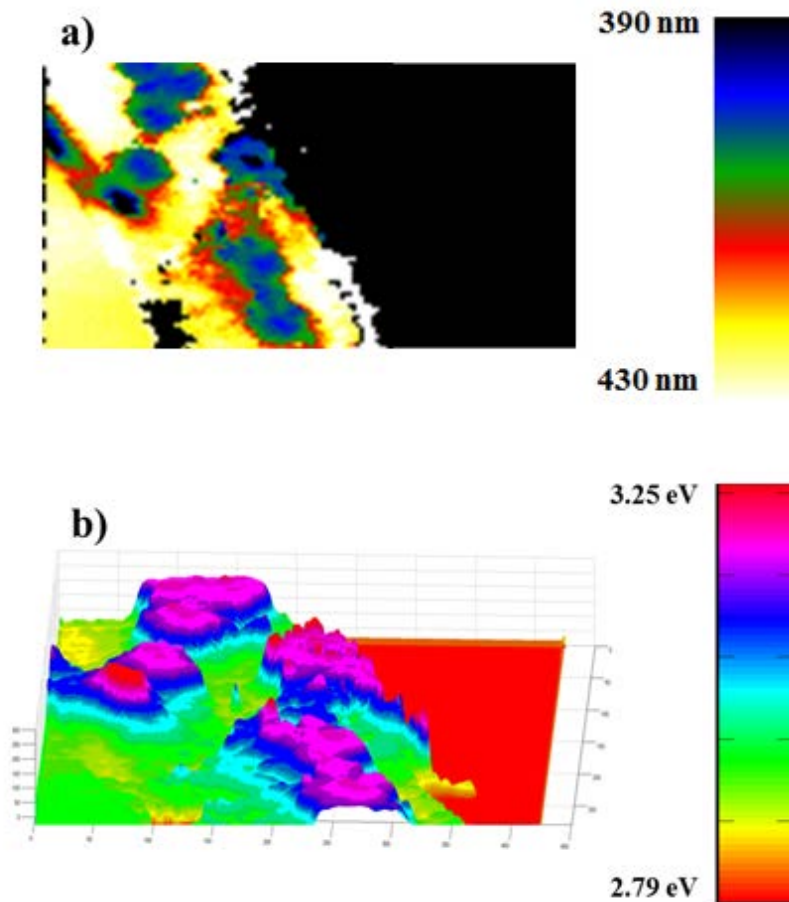


Figure 4.2.3 a) peak center wavelength map by gaussian fitting from each pixel, b) 3D reconstruction image by electron energy from a).

그 결과, Figure 4.2.3와 같이 v-groove에서는 다른 영역에 비해 band gap energy가 높았으며, 이 것은 dislocation 주위 energy barrier로 작용하여 carrier가 non-radiative center인 dislocation으로 이동을 막는 역할을 하므로, 식 4.2.1에 따라 non-radiative lifetime를 길게 만든다.

$$\tau_{nr} = \tau_{nr}^0 \exp^{E_A/kT} \quad (4.2.1)$$

따라서 v-groove가 생성한 barrier는 발광 효율을 높이는 인자로 작용할 것으로 예상되며, v-groove가 생성한 barrier + v-groove 주변 QD에 의한 carrier capture effect가 복합적으로 작용하여 barrier의 높이를 더욱 크게 만들어 LED의 효율을 높일 것으로 예상된다.

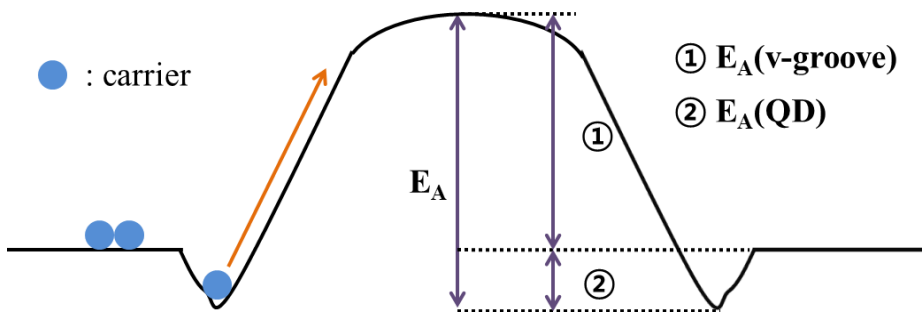


Figure 4.2.4 Schematic of energy diagram near v-groove.

5. 결 론

본 연구에서는 현재 활발하게 연구되고 있는 InGaN/GaN hetero-structure를 이용한 LED에서 내부 구조와 발광 특성간 관계에 대해 알아보고자 하였다. 기존 연구에서는 이러한 관계를 알아보고자 SEM-CL 시스템이 주로 이용되어왔지만, 시스템의 공간적 분해능 한계로 미세구조와 발광특성 사이 관계에 대한 논란이 있다.

따라서 이러한 관계를 밝히고자 TEM과 CL이 결합된 시스템을 이용하였으며, 상용화된 LED를 이용하여 최대한 객관적인 데이터를 얻고자 하였다.

Cross-sectional sample을 이용하여 LED의 구조를 파악한 후 TEM-CL을 이용하여 내부구조와 발광특성을 확인하였으며, 발광 특성의 공간상 분포를 확인하고자 plan-view 시편을 이용하여 TEM-CL을 진행하였다.

TEM-CL 결과, QWs의 두께가 얇아질수록 wave function의 overlap이 더 잘 발생하여 높은 intensity를 나타냈다. 또한 QWs 내부에 존재하는 In rich한 QD에서 spectrum은 QW보다 FWHM이 넓고, red shift된 발광 특성을 나타냈으며, 이러한 QD의 분포는 v-groove 주변에서 자주 나타났다. 이러한 QDs는 QWs보다 energy band gap이 낮기 때문에 non-radiative center로 이동하는 carrier를 효과적으로 capture하므로 LED의 효율 상승에 중요한 역할을 하게 된다.

V-groove에서는 평면상 존재하는 QWs보다 더 짧은 파장의 빛을

발생시켰으며, 이는 v-groove에서 QWs의 두께가 얇아짐에 따른 quantum confine effect로 설명할 수 있었다. 이러한 결과를 이용하여 gaussian fitting 후 peak center를 energy band gap으로 변환하여 3D로 재구성하였으며, 3D map 상에서 v-groove는 주변보다 높은 energy barrier를 생성함을 확인하였다. 이와 같은 energy barrier는 carrier가 non-radiative recombination center인 dislocation으로 이동하는 것을 방해하여 non-radiative lifetime가 길어지게 만드는 역할을 하므로 LED의 효율을 높일 수 있다..

이와 같은 결과는 기존 연구와 다르게 미세 구조와 발광특성 관계를 직접적으로 보여주었다는 것에 의의가 있다. 그리고 이러한 결과는 앞으로 LED의 발광 메커니즘을 이해하는데 중요한 방향성을 제시하여, 고성능 LED 소자 개발에 도움을 줄 것으로 기대된다.

References

- [1] M.R.Krabetscek et al., Radiation Measurements, 27 (1997) 695-748
- [2] A. M. Stoneham, Rep. Prog. Phys., 44 (1981) 1252-1291
- [3] S. Nakamura, Science, 281 (1998) 956-961
- [4] J. Piprek, Phys. Status Solidi A, 207 (2010) 2217-2225
- [5] G. Verzellesi, D. Saguatti et al., Journal of Applied Physics, 114 (2013) 071101
- [6] B. G. Yacobi and D. B. Holt, Journal of Applied Physics, 59 (1986) R1-R24
- [7] M. Zhang, P. Bhattacharya et al., Applied Physics Letters, 95 (2009) 201108
- [8] P. T. Landsberg, phys. Stat. sol., 41 (1970) 457-489
- [9] S. F. Chichibu, A. Uedono et al., Philos. Mag., 87 (2007) 2019-2039
- [10] S.F. Chichibu, T. Onuma et al., Journal of Vacuum Science & Technology, 21 (2003) 1856-1862
- [11] A. Hangleiter, C. Netzel et al., Philos. Mag., 87 (2007) 2041-2065
- [12] N. K. Dutta and R. J. Nelson, Journal of Applied Physics, 53 (1982) 72-92
- [13] Y. C. Shen, G. O. Mueller et al., Applied Physics Letters, 91 (2007) 141101
- [14] J. Hader, J. V. Moloney et al., Applied Physics Letters, 92 (2008) 261103
- [15] A. Laubsch, M. Sabathil et al., IEEE Transactions on Electron Devices, 57 (2010) 79-87

- [16] A. G. Aberle, S. Glunz and W. Warta, Journal of Applied Physics, 71 (1992) 4422-4431
- [17] V. K. Khanna, Progress in Quantum Electronics, 29 (2005) 59-163
- [18] H. P. T. Nguyen et al., Nanotechnology, 23 (2012) 194012
- [19] C. Shi et al., Applied Physics Letters, 74 (1999) 573-575
- [20] F. D. Sala, A. D. Carlo et al., Applied Physics Letters, 74 (1999) 2002-2004
- [21] S. F. Chichibu, A. C. Abare et al., Applied Physics Letters, 73 (1998) 2006-2008
- [22] T. Takeuchi, H. Amano and I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys, 39 (2000) 413-416
- [23] S. Ling, T. Lu et al., Applied Physics Letters, 96 (2010) 231101
- [24] D. Nakaji, V. Grillo et al., Journal of Electron Microscopy, 53 (2005) 223-230
- [25] M. Kumar, V. N. Singh et al., Applied Physics Letters, 92 (2008) 171907
- [26] A. Hangleiter, F. Hitzel et al., Physical Review Letters, 95 (2005) 127402
- [27] F. Hitzel, G. Klewer et al, Physical Review B, 72 (2005) 081309

Abstract

In nowadays, efficiency of Light Emitting Diode (LED) have been continuously increased and applications of devices have been also expanded after development of red light emitting device at 1970. In particular, the nitride-based semiconductor (AlN, GaN, InGaN, AlGaIn, etc.) can be changed in the energy band gap dependence on composition ratio. So it makes the LED emit the light from the red region to the UV region. In addition, the LED is eco-friendly and smaller power consumption, long life, and many other advantages. Thus the LED market is growing rapidly, and many researchers have been studied to lower the cost of the LED package that is now about 12.5 \$ / klm and will be down to approximately 2 \$ / klm in 2015. Therefore, in order to achieve this goal for an increase in emission efficiency, research for that must be carried out essentially.

Ideally, the internal quantum efficiency of the LED is proportional to the electric current intensity. However, that is changed by microstructure of the LED so that it is very important that research of the relation between microstructure and emission properties of the LED in development of the LED.

Many researchers have used Scanning Electron Microscopy CL and PL for analyzing of luminescence properties of the LED. But those methods have the limitations of the equipment due to the spatial resolution so it is unsuitable in analyzing the LED characteristics of the localized area. In this experiment, the system combined Transmission Electron Microscopy (TEM) with CL (Cathodoluminescence) was used for characterization of a commercial LED.

Firstly, to find the condition of TEM-CL, emission intensity according to

the thickness of the QWs were compared. So we could find that the condition of TEM-CL corresponded to low-excitation condition in PL. Next, to find the relation between luminescence properties and microstructure of LED, we had the TEM-CL experiment by using cross-section sample. And to understand luminescence properties in totally area of the sample, we used plan-view sample for TEM-CL.

Here, we found that wavelength of the LED became shorter with lowering In content and thinning thickness of QWs. Especially, wavelength of v-groove is much shorter than one of any other region. Also, we could find QDisk nearby v-groove which has lower energy band gap than MQWs. So it can effectively capture the carrier generated in the LED, therefore, it can make efficiency of the LED more high. And v-groove that has high energy band gap plays an energy barrier which can protect from recombination at dislocation so that it also makes efficiency of the LED higher.

Keyword : TEM-CL, LED, v-groove, luminescence property

Student ID : 2012-20627

Name : Jong-Hwan, Lee